HANDLING
YOUR
FOOTPRINT

15 de septiembre de 2022

First Quantum Minerals

Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA);

Número de Documento:
P21 005 RP 003

Prepared to:
Carlos Hubner
First Quantum Minerals / Cobre Panamá
Torres de Las Américas, Torre A, Piso 21
Ciudad de Panamá, Panamá

0	15.09.2022	F.O./A.V.	E.L.	G R	C.H.	Versión Final
B	11.03.2022	A.V./I.P./F.O.	E.L.	G R	C.H.	Revisión del Cliente
A	07.03.2022	A.V./I.P./F.O.	E.L.	G R	C.H.	G. Examen interno
Rev.	**Fecha**	**Preparado por**	**Revisado por**	**Aprobado por**	**Cliente**	**Control de Cambios**

INDICE

1. Introduccion 3
2. Proposito 4
3. Alcance 4
4. Marco FMEA 5
4.1. Definiciones 5
4.2. Modos de Fallo General 6
4.2.1. Desbordamiento 6
4.2.2. Inestabilidad Global 6
4.2.3. Fallo por Terremoto 7
4.2.4. Erosión de la Presa Externa 7
4.2.5. Erosion de la Presa Interna 8
4.2.6. Erosión del Suelo de la Fundacion 8
4.2.7. Sabotaje 9
4.2.8. Generación de Filtración Ácida 9
4.2.9. Filtración contaminada del suelo. 9
5. Visión General de la Instalación 10
5.1. Producción de Relaves 12
5.2. Presas de Arranque 13
5.3. Elevación de la Presa 13
5.4. Sistema de Impermeabilizacion 17
5.5. Desagües subterraneos 17
5.6. Gestion del Agua 21
5.6.1. Diseño de Inundaciones 21
5.6.2. Francobordo 21
5.6.3. Sistema de la Torre de Decantación 22
5.6.4. Gestión de Filtraciones 22
6. Metodologia FMEA 22
6.1. Matriz de Probabilidad 22
6.2. Matriz de Consecuencias 23
6.3. Matriz de Clasificación de Riesgo 26

6.4. Identificación de Modo de Fallo....27
6.5. Taller FMEA 30
7. Resultados FMEA 31
8. Conclusiones 32
9. Referencias 33

FIGURAS

Figura 1-1: Geo referencia y diseño del TMF 3
Figura 5-1: Vista del Plan de las Estructuras Principales del TMF [Ref. 9]....12
Figura 5-2: Detalle de una sección tipica de la Presa de Arranque del Norte [Ref. 9] 13
Figura 5-3: Sección Típica – Presa Norte [Ref. 9] 15
Figura 5-4: Sección Típica – Presa Este [Ref. 9]....16
Figura 5-5:Detalle del sistema de impermeabilizacion para la Presa Norte [Ref. 16]....17
Figura 5-6: Detalle tipico del drenaje primario (izq) y del drenaje general (derecha) [Ref. 9] 18
Figura 5-7: Detalle tipico de drenaje de dedos [Ref. 9] 19
Figura 5-8: Esquema del Sistema de drenaje inferior para la Presa Norte 20
Figura 5-9: Esquema del Sistema de drenaje inferior para la Presa Este 20
Figura 5-10: Continuacion del Sistema de Drenaje Inferior de la Presa Este 20

TABLAS

Tabla 5-1: Comparación de JVP y de las Secciones de Diseño Detalladas (KCB) [Ref. 9] 11
Tabla 5-2: Tasa de Producción de Relaves [Ref. 9]....13
Tabla 5-3: Tipos de Drenajes Subterraneos [Ref. 9] 18
Tabla 6-1: Matriz de Probabilidades 23
Tabla 6-2: Matriz de Consecuencia 24
Tabla 6-3: Matriz de Clasificación de Riesgos 26
Tabla 6-4: Ejemplo de modo fallo y sus controles 28
Tabla 6-5: Numero de modo de fallo y eventos identificados para cada presa 30
Tabla 6-6: Participantes del taller FMEA 30
Tabla 7-1: Matriz de Riesgo con controles de diseño 31
Tabla 7-2: Matriz de Riesgo con controles de diseño y operativos 32

APÉNDICES

APÉNDICE A Hoja de cálculo de probabilidad

APÉNDICE B Hoja de cálculo de consecuencias

1. INTRODUCCIÓN

First Quantum Minerals Ltd (FQML) opera el proyecto minero Cobre Panamá, ubicado en el distrito de Donoso, provincia de Colón, 120 km al oeste de la ciudad de Panamá y 20 km al sur de la costa del Mar Caribe.

La Instalación de Manejo de Relaves (TMF) contiene relaves convencionales con dos presas perimetrales ubicadas al norte y al este de la TMF (Presas Norte y Este, respectivamente) a medida que la topografía natural del sitio aumenta la elevación hacia el sur. La ubicación regional del depósito y un diseño de la TSF en el año siete de operación se muestra enFigura 1-1.

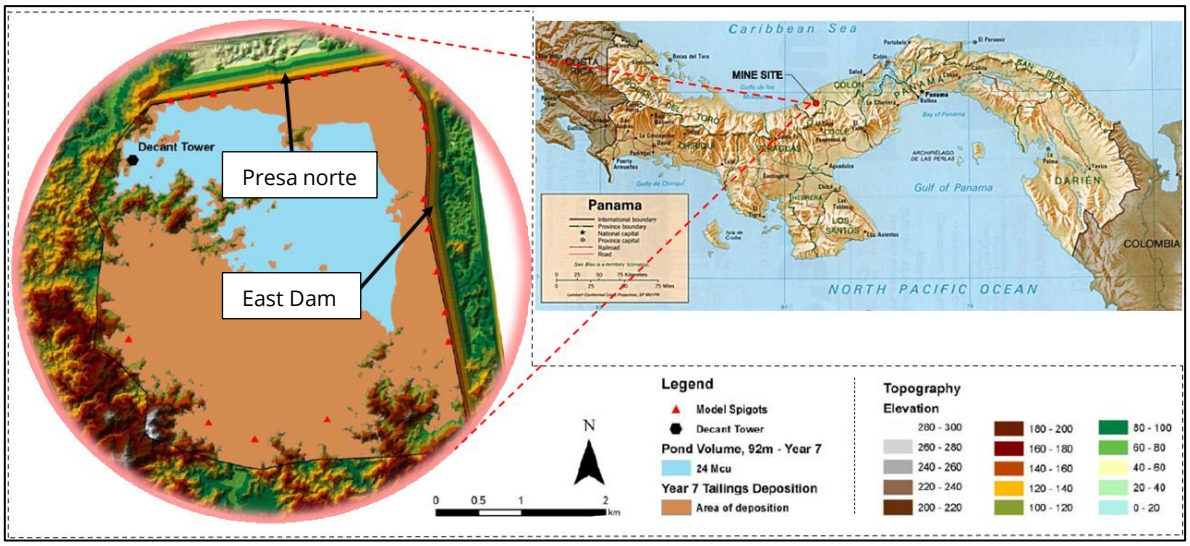

FIGURA 1-1: REFERENCIA GEOGRÁFICA Y DISEÑO DE TMF

El TMF tiene una vida operativa planificada de 18 años y una capacidad de almacenamiento de 1.5 Bt. El diseño de las presas comprende presas de partida a partir de material prestado compuesto por capas horizontales de saprolita. Las presas se levantarán progresivamente utilizando arena colocada hidráulicamente procedente del subdesbordamiento del ciclón bajo la metodología de línea central modificada.

FQML ha solicitado a Nava Consulting SpA (Nava) que desarrolle un Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA) de la situación actual de Cobre Panamá TMF para identificar todos los modos de falla y niveles de riesgo asociados con sus operaciones y así poder ajustar sus controles, operaciones y procedimientos. Este documento presenta los resultados del FMEA.

2. PROPÓSITO

El objetivo de este documento es presentar el FMEA para el TMF de Cobre Panamá para la situación actual (hasta el quinto año de operación), incluidos los posibles modos de falla, eventos que pueden desencadenar los diferentes modos de falla, probabilidades, consecuencias y nivel de riesgo para todos los eventos identificados.

El FMEA tiene como objetivo identificar todos los modos de falla potenciales, las consecuencias de estos modos de falla, los mecanismos de falla y cómo se pueden evitar o controlar los riesgos asociados con las fallas [Ref. 3].

Cuando se aplica a una presa de relaves, el FMEA se centra en desarrollar un panorama general de la presa, incluidos sus diversos componentes y cómo interactúan de manera sistemática[Ref. 4]. Un modo de fallo puede desencadenarse por una causa específica o por la concatenación o simultaneidad de dos o más causas.

Utilizando esta base, el FMEA del TMF de Cobre Panamá tiene como objetivo evaluar cómo las fallas de los componentes pueden conducir a fallas globales del sistema, las consecuencias de estas fallas y la criticidad de los diferentes componentes del TMF para el control de riesgos, con el propósito de realizar cambios en el diseño y operación de la instalación de relaves si es necesario.

GISTM recomienda desarrollar un análisis de riesgos (FMEA o similar) al menos cada tres años y con mayor frecuencia siempre que haya un cambio material ya sea en la instalación o en el contexto económico social, ambiental y local. Transmitir las evaluaciones de riesgos a la ITRB o al revisor técnico independiente superior para su revisión, y abordar con urgencia todos los riesgos inaceptables de las instalaciones de relaves (Requisito 10.1) [Ref. 14]

3. ALCANCE

En este FMEA se consideran las siguientes actividades:

- Revisión de antecedentes que incluye el diseño y los documentos y dibujos construidos y los documentos operativos
- Identificación de modos de fallo
- Evaluación de la probabilidad de cada modo de fallo
- Evaluación de las posibles consecuencias de cada modo de fallo
- Evaluación del nivel de riesgo de cada modo de fallo

El análisis se ha llevado a cabo para todas las estructuras de contención de la TSF: Presa Norte y Presa Este.

4. MARCO FMEA

FMEA es una herramienta de evaluación de riesgos que permite la identificación y el análisis sistemático de los diferentes modos de falla, incluida su probabilidad y posibles consecuencias [Ref. 1] [Ref. 2].

El FMEA también puede perseguir la definición de medidas de mitigación para evitar o controlar los riesgos asociados [Ref. 3].

El FMEA es generalmente específico del sitio y considera los datos del sitio, el método de construcción, los materiales de construcción y el comportamiento pasado de la estructura[Ref. 5]. Como resultado, puede ser un proceso complejo que requiere un tiempo considerable (a veces incluso son necesarias investigaciones de campo o de laboratorio). A pesar de esto, el FMEA demuestra ser una herramienta muy útil, ya que permite evaluar y gestionar los riesgos.

De acuerdo con el trabajo realizado por Dos Santos et al., [Ref. 6] un FMEA es efectivo para demostrar los posibles modos de falla de todos los componentes de un sistema de instalación de relaves, lo que permite el desarrollo de un sistema integral de monitoreo y vigilancia de presas.

FMEA requiere matrices de probabilidad y consecuencia, que generalmente son definidas por el propietario de la mina o siguiendo las normas internacionales. Estas matrices definen los niveles de probabilidad y consecuencia que servirán para clasificar posteriormente los riesgos de la instalación. La consecuencia se puede estimar desde diferentes aspectos como ambiental, social, económico, legal, reputacional, entre otros.

4.1. DEFINICIONES

TSF/TMF: Instalación de almacenamiento de relaves/Instalación de gestión de relaves

FMEA: Análisis de modo de fallas y sus consecuencias

PMF: Inundación Máxima Probable

MCE: Terremoto Maximo Creible

ARD: Drenaje ácido de roca

Modos de falla: Una de las formas en que un sistema o estructura puede fallar; una de sus posibles deficiencias o defectos.

Disparadores: Una de las posibles causas de un modo de falla observado

4.2. MODOS GENERALES DE FALLO

Hay modos de fallo aplicables a todos los TMF existentes. Como el TMF es esencialmente una estructura de contención, sus modos de falla han sido ampliamente estudiados en la literatura, además de estar respaldados por las catástrofes que han ocurrido a lo largo del tiempo. [Ref. 11]

Los modos generales de fallo para un TMF se presentan en las siguientes secciones. Sus desencadenantes (causas de la falla) estarán determinados por las características individuales de cada TMF, como su entorno geológico e hidrológico, la geometría de las presas, las características de los materiales de construcción, el plan de gestión del agua, entre otros, y la interacción de estas variables.

4.2.1. DESBORDAMIENTO

Este modo de falla corresponde a una situación de desbordamiento de agua y/o relaves sobre la cresta de la presa. Esta condición crítica puede originarse a partir de diferentes causas raíz, algunas de las cuales no son necesariamente desencadenantes de sobrecarga, pero cuando se concatenan con otra causa raíz, podrían generar esta condición crítica.

El desbordamiento también podría generar un proceso de alta erosión de la cresta y la pendiente aguas abajo, formando una brecha en la presa y la pérdida de contención de relaves.

Algunos factores que podrían desencadenar este modo de falla son:

- Pérdida de la elevación de la cresta debido a un gran evento sísmico.
- Aumento del nivel del agua debido a un evento de inundación mayor de lo esperado en el diseño.

El desbordamiento generalmente se analiza para dos situaciones diferentes. Primero, sobrepasar durante un evento hidrológico, generalmente llamado evento de día lluvioso. Además, el desbordamiento se analiza para un evento de día soleado, que no está asociado a un evento hidrológico sino a problemas o errores durante la operación (por ejemplo, una elevación más lenta de la presa).

4.2.2. INESTABILIDAD GLOBAL

Este modo de falla implica la falla global de la presa de retención debido a la generación de una falla por deslizamiento a través del cuerpo de la presa o el suelo de cimentación. Este modo de falla se controla cuando existe un diseño robusto tanto de la presa como de la cimentación según las condiciones del sitio (terremoto, eventos climáticos, geología, entre otros) con una adecuada caracterización geotécnica de las propiedades mecánicas del material utilizado en su construcción y los suelos de cimentación además de un monitoreo efectivo que permita advertir situaciones desfavorables para la estabilidad del muro.

Algunos factores que pueden producir este modo de fallo son los siguientes:

- El diseño subestima el diseño del terremoto y/o inundación.
- Mala caracterización geotécnica de la presa o materiales de cimentación.
- Aumento del nivel freático debido a problemas en el sistema de drenaje.
- Mal QA/QC (Control de Calidad/Aseguramiento de Calidad) durante la construcción de la presa.

4.2.3. FALLA SÍSMICA

En este modo de falla, la estabilidad global/local de la presa se ve comprometida debido a la ocurrencia de un terremoto que genera deformaciones mayores a las esperadas en el diseño, lo que puede desencadenar la rotura o desbordamiento de la tubería, lo que lleva a la erosión de las pendientes de la presa, comprometiendo la integridad del TMF. Este modo de falla también puede ocurrir porque la presa falla durante el evento sísmico debido a la generación de una superficie de deslizamiento a través de la presa o el suelo de cimentación.

Algunos factores que podrían desencadenar este modo de falla:

- Sobreestimación de las propiedades de los materiales de la presa durante las pruebas de laboratorio debido a una campaña deficiente de caracterización.
- Control de calidad/Aseguramiento de la calidad deficiente durante la fase de construcción. Los materiales no compactados se colocan en ciertas áreas de la presa, y en presencia de un nivel freático un evento sísmico podría conducir a un comportamiento no drenado (o licuefacción en el caso de las presas de arena) no esperado en el diseño y, por lo tanto, falla de la presa.
- Geometría diferente al diseño con pendientes más pronunciadas que comprometen la estabilidad.
- Problemas en el sistema de drenaje, que pueden deberse a deficiencias en el proceso de construcción o a una garantía de mala calidad.

4.2.4. EROSIÓN EXTERNA DE LA PRESA

Este modo de fallo se produce debido a la erosión superficial del material de la presa debido al líquido en contacto con la pendiente aguas abajo y/o la cresta. Esto puede ocurrir, por ejemplo, debido a un evento climático extremo (lluvias, inundaciones, entre otros) o rotura de tuberías con agua o relaves. Esta erosión puede ser lo suficientemente significativa como para generar una brecha en la presa, perdiendo la contención de los relaves que fluirán aguas abajo.

Algunos factores que pueden producir este modo de falla:

- El diseño del embalse subestimó las precipitaciones.

- Mala compactación de la presa.
- Diseño inadecuado de la gestión de aguas superficiales.
- Rotura incontrolada de tuberías en la cresta o pendiente aguas abajo de la presa.

4.2.5. EROSIÓN INTERNA DE LA PRESA

Este modo de falla ocurre cuando hay migración de partículas dentro de la presa debido al contacto con agua que crea un alto gradiente hidráulico además de condiciones granulométricas e in situ en la presa que favorecen la ocurrencia de este fenómeno (alta heterogeneidad de partículas y baja densidad). En este modo de falla se eliminan las partículas finas de la presa, generando una superficie de menor resistencia dentro de la presa, a través de esta superficie se filtra agua y se podría generar una falla.

Este modo de falla también puede ocurrir debido a la migración de relaves hacia la presa, cambiando la permeabilidad de una superficie que crea zonas saturadas en la presa. Si el comportamiento no drenado del material no se considerara en el diseño para estas zonas, podría ocurrir una falla de la presa.

Este modo de falla tiende a ser progresivo, ya que puede ser detectado por la presencia de agua en la pendiente aguas abajo de la presa.

Algunos factores que pueden desencadenar este modo de falla son los siguientes:

- Ausencia de un sistema de impermeabilización en la cara aguas arriba de las presas que tienen contacto con el agua.
- Aumento del gradiente hidráulico (crecimiento del estanque).
- Falta de pruebas de caracterización de los materiales que componen la presa.
- El proceso de construcción no cumple con los estándares de diseño, dejando capas con menor compactación que favorecen las vías de flujo preferenciales para el agua.
- Fallo del sistema de impermeabilización por deformación, desgarro o punción.
- Falta de materiales de transición o un diseño inadecuado de estos.
- Materiales que no cumplen con la distribución de tamaño de partícula (PSD) requerida para lograr la compatibilidad del filtro y la estabilidad interna.

4.2.6. EROSIÓN DE LOS CIMIENTOS DEL SUELO

Este modo de fallo se produce debido a la migración de partículas en la cimentación de la presa debido a un alto gradiente hidráulico. Desde la base migran los granos más finos del material, debilitando la estructura granular.

En este modo de falla, como en la erosión de la presa, se genera una superficie de menor resistencia a través de la cual se filtra el agua, lo que lleva a la falla de la presa.

Algunos factores que pueden desencadenar este modo de falla son los siguientes:

- Mal funcionamiento del sistema de drenaje que conduce a la acumulación de agua y genera un aumento del gradiente hidráulico.
- Acumulación de agua en contacto con la presa por mal funcionamiento, generando un aumento del gradiente hidráulico.

4.2.7. SABOTAJE

Este modo de falla agrupa todos los posibles actos maliciosos que podrían ocurrir dentro del TMF, llevados a cabo por una persona o grupo de personas. Estos actos comprometen la integridad de la instalación. Algunas de las acciones generalmente consideradas para un FMEA son:

- Uso de explosivos en la cresta de la presa, lo que podría generar una pérdida de francobordo y una descarga de relaves o falla estructural de la presa.
- Excavación de una zanja en la presa (cresta, aguas abajo, estribos) comprometiendo la estabilidad estructural de la presa o su capacidad para almacenar relaves.
- Las acciones del hacker anulan el control de las válvulas, lo que afecta el plan de deposición del depósito, lo que lleva a un exceso y pérdida de relaves.

4.2.8. GENERACIÓN DE FILTRACIÓN ÁCIDA

El drenaje ácido de roca (ARD) está asociado con el drenaje producido por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando se exponen al aire y al agua. Este drenaje ácido puede generarse a partir de los relaves, materiales de la presa o materiales de los desagües.

Este modo de falla está asociado con cumplimientos ambientales y sociales en lugar de fallas estructurales del depósito.

4.2.9. FILTRACIÓN CONTAMINADA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Este modo de falla está asociado con un incumplimiento ambiental y está relacionado con la filtración de agua de la cuenca hacia el agua subterránea, que contamina la fuente de agua de las comunidades cercanas.

Las filtraciones pueden ocurrir debido a la falta de impermeabilización en la base o sistemas de recolección inadecuados.

4.2.10. DESCARGA DE AGUA CON CONTAMINANTES POR ENCIMA DEL UMBRAL DE LA INSTALACIÓN

Este modo de fallo está asociado con la descarga de agua debido al funcionamiento de la torre de decantación con una concentración de contaminantes por encima de un umbral.

Esta condición puede ocurrir debido a una concentración excepcional de suspensión sólida o alteraciones en las características químicas del agua.

5. VISIÓN GENERAL DEL MECANISMO

El TMF tiene múltiples etapas de diseño, preparadas en primera instancia por AMEC (2010-2011) liderando la campaña de investigación geotécnica del sitio y desarrollando el primer informe de viabilidad. Más tarde, JVP (2013) abordó las siguientes etapas de ingeniería del proyecto, desarrollando el informe de diseño de estado, la investigación de cimientos y el informe técnico de investigación geotécnica del sitio de la mina. Finalmente, KCB (2015-2018) preparó una revisión de diseño.

El trabajo de JVP se dirigió principalmente a la presa inicial de la presa norte y este, compuesta por saprolita obtenida del sitio. Las etapas de crecimiento se proyectaron con el material de la planta ciclónica (subdesbordamiento) bajo el método aguas abajo. La ingeniería desarrollada por JVP fue modificada posteriormente por KCB, siendo la principal el cambio de metodología de crecimiento, cambiando a un eje central modificado que permitió una reducción de materiales.

Un resumen de la modificación realizada por KCB se detalla en la Tabla 5-1. Por otro lado, una vista en planta de las estructuras principales del diseño resultante se presenta en la Figura 5-1.

TABLA 5-1: COMPARACIÓN DE JVP Y DE LAS SECCIONES DE DISEÑO DETALLADO (KCB) [REF. 9]

Características:	JVP (2013a)	Diseño detallado (KCB)	Resumen del cambio/beneficio
Elevación de la cresta	141 m	146 m	Elevado para cumplir con los requisitos de almacenamiento de relaves y almacenamiento de la etapa modificada de TMF a partir del nuevo método de elevación.
Ancho de cresta	20 m	20 m (máximo) 50 m (operaciones)	50 m de ancho de cresta de operaciones para permitir la colocación de celdas hidráulicas y mayor ancho para acomodar equipos de construcción y tuberías de distribución de relaves.
Método de elevación	Aguas abajo	Línea central modificada (aguas abajo de El. 85, luego la línea central a 146 m)	Menos relleno, huella más pequeña reducción de las cantidades de construcción (32%), costos y alivia los riesgos de programación.
Pendiente aguas abajo	3H:1V con bermas	3H:1V con bermas	Las bermas del talud se redimensionaron durante el diseño detallado para acomodar la sección de elevación de la línea central modificada
Diseño del desagüe inferior	Drenaje de manta sobre la huella con drenajes primarios y secundarios. Todos los drenajes incluían relleno de Zona 3 y 9.	El drenaje de la manta incluye solo la Zona 3 y el área de colocación se redujo. Drenajes primarios y de dedos con Zona 9	Se utilizó un modelo 3D de aguas subterráneas para optimizar el diseño del drenaje subterráneo y reducir significativamente las cantidades en aproximadamente un 60% a JVP (2013a)
Barrera de filtración	El núcleo de saprolita extendido desde los terraplenes de arranque a lo largo de la pendiente aguas arriba del desbordamiento se eleva hasta El. 84, M	Se colocó la geomembrana sobre la pendiente aguas arriba de la sección de elevación aguas abajo (a El. 85 m	Se mantuvo la barrera de filtración mientras se establecía el ancho de la playa de diseño, pero se modificó a geomembrana después de discutir con FQML sobre los desafíos de colocación de saprolita durante el estudio de compensación [Ref. 15]
Plataformas de Roca Estéril	Plataformas rocosas de residuos del norte a través de grandes drenajes. Las plataformas de roca de desecho del terraplén del este no se detallaron pero el terraplén se debía levantar a El. 84 m utilizando roca de desecho y sin arena de desagüe.	Plataformas rocosas de residuos del norte a través de grandes drenajes. Se detallaron las plataformas de roca de desecho del este y se modificó la planificación de la construcción, por lo que todos los levantamientos se construyen con arena subterránea.	Plataformas rocosas de desechos del norte optimizadas para mantener la pendiente hacia la puntera del talud después de un posible asentamiento, plataformas rocosas de desechos del este optimizadas para reducir las cantidades y dirigir la escorrentía de la superficie a las áreas centrales de recolección aguas abajo del dedo del pie del terraplén.

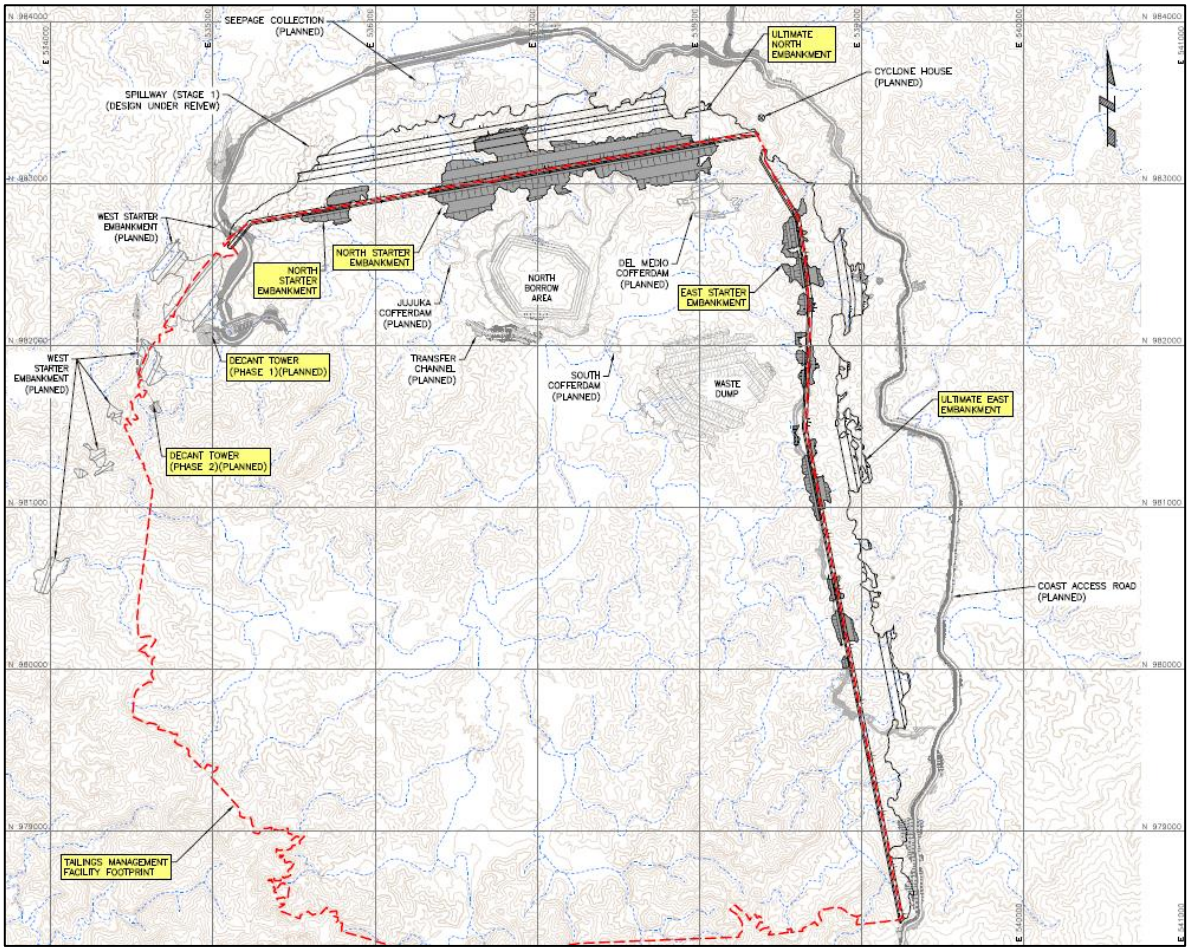

FIGURA 5-1: VISTA EN PLANTA DE LAS PRINCIPALES ESTRUCTURAS DE TMF[REF. 9].

5.1. PRODUCCIÓN DE RELAVES

Debido a diferentes circunstancias durante el proceso de obtención de minerales, Cobre Panamá produce y almacena relaves más limpios y ásperos en el TMF en un porcentaje del 10% y 90% respectivamente.

En el caso de relaves más limpios, KCB informa que debido a los estudios realizados, se ha identificado que estos son potenciales generadores de ácido [Ref. 9]. Por lo tanto, estos relaves se depositan directamente en el TMF bajo el agua bajo el estanque de sobrenadante.

Al mismo tiempo, la fracción más rugosa no se ha caracterizado como una fuente potencial de generación de ácido, por lo que se deposita desde las presas perimetrales y dependiendo de su requerimiento, el material pasará por la planta ciclónica para obtener las arenas que se depositarán en celdas hidráulicas para las elevaciones de los terraplenes.

Un resumen de la producción estimada de relaves durante la operación del depósito se muestra en la Tabla 5-2.

TABLA 5-2: TASAS DE PRODUCCIÓN DE RELAVES[REF. 9].

Año de funcionamiento	Producción de relaves enteros		Producción de relaves más ásperos (tpd)	Producción de relaves más limpios (tpd)
	Mt por año	tpd		
1	45	123 000	111 000	12 000
2 a 9	70	192 000	173 000	19 000
>9	100	274 000	247 000	27 000

5.2. PRESAS DE ARRANQUE.

Las presas de arranque fueron diseñadas para retener el agua directamente en el star–up hasta que se estableciera una playa de relaves. La sección de la presa incluye un núcleo de saprolita de baja permeabilidad con una capa de saprolita y relleno de roca separada por filtros granulares y zona de drenaje [Ref. 9]. Una sección típica de la Presa del Arranque del Norte se muestra en la Figura 5-2.

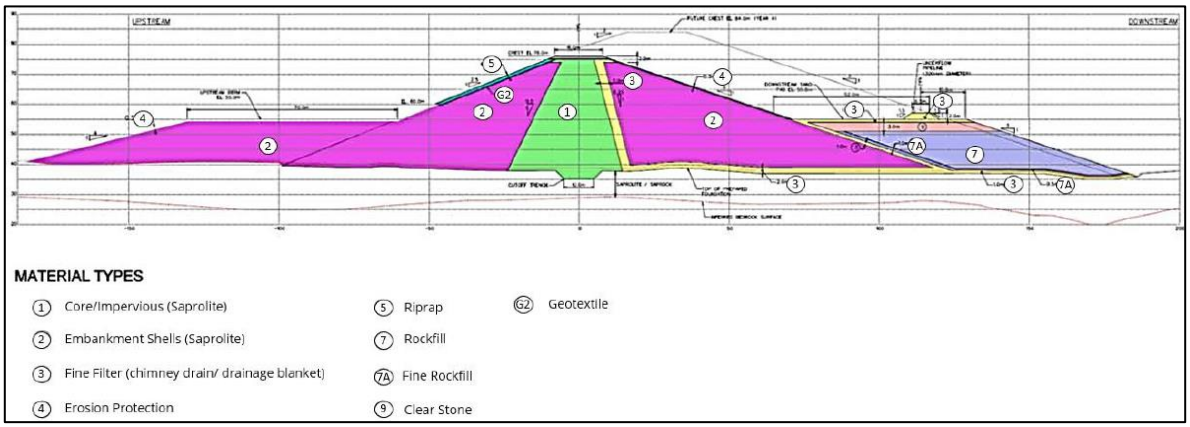

FIGURA 5-2: DETALLE DE SECCIÓN TÍPICA DE LA PRESA DE ARRANQUE NORTE [REF. 9]

5.3. AUMENTO DE PRESAS

Las elevaciones de las presas norte y este se construyen con arena de subdesbordamiento que se coloca y compacta en celdas hidráulicas. Cuando la construcción de celdas hidráulicas es difícil, como en áreas más bajas del suelo, se construirán plataformas de roca de desecho. Éstos están en los tres drenajes principales de la huella de la Presa del Norte así como los canales de drenaje principales y áreas bajas locales en la fundación de la Presa del Este.

Las presas se levantarán con el método aguas abajo a El. 85 cuando los modelos de deposición de relaves predicen que se establecerá la playa de diseño. Por encima de El. 85 m, las presas se elevarán utilizando el método de la línea central. Según el diseño, el estanque está alejado al menos 400 m de la cara aguas arriba de la presa [Ref. 18]. La pendiente aguas abajo de las presas es de 3H:1V.

Es importante destacar que la elevación de transición entre los métodos de elevación aguas abajo y la línea central debe confirmarse durante las operaciones basadas en el desarrollo real de la playa de relaves. Si la playa de relaves no se desarrolla como se predijo, podría ser necesario elevar la elevación de transición o desarrollar metodologías alternativas.

Las secciones típicas de las presas del norte y del este se muestran en Figura 5-3 y Figura 5-4.

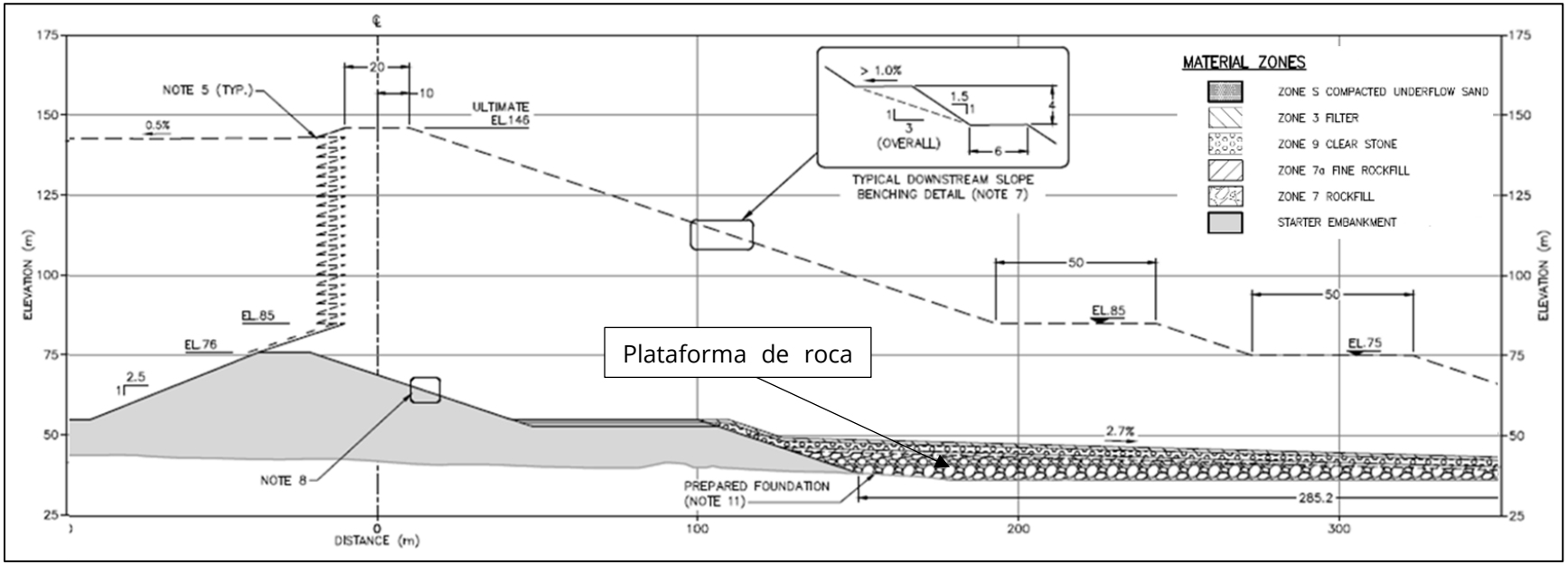

FIGURA 5-3: PRESA NORTE - SECCIÓN TÍPICA [REF. 9]

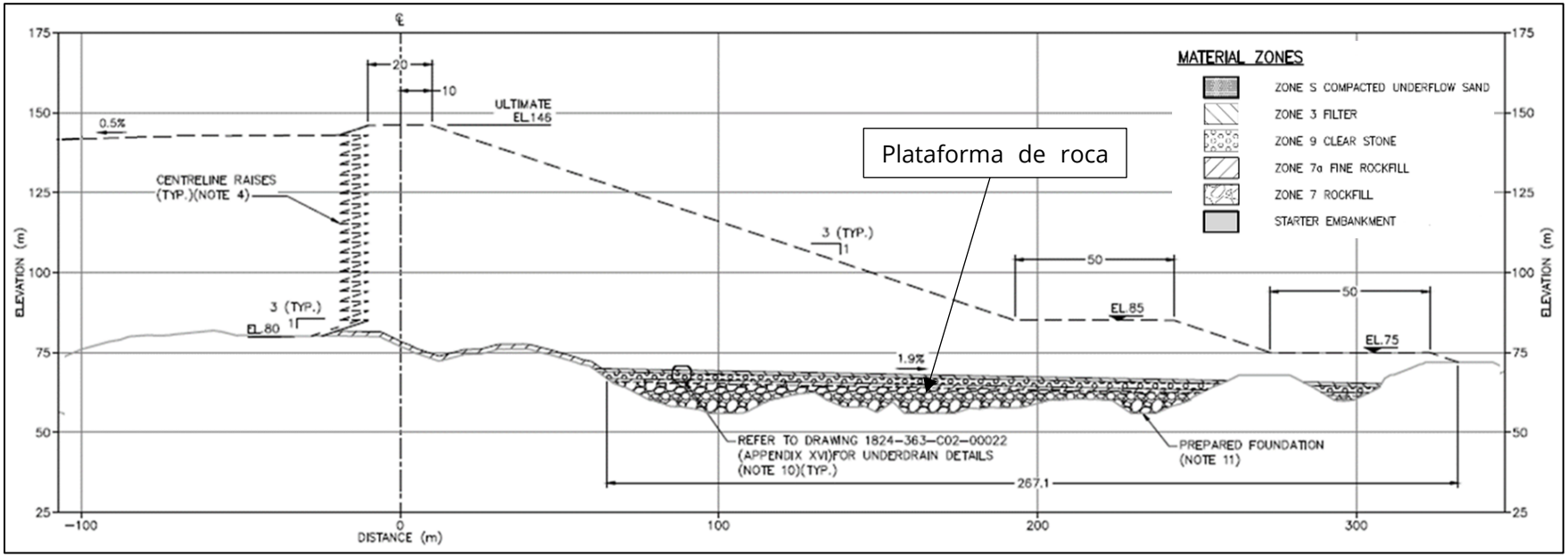

FIGURA 5-4: PRESA ESTE - SECCIÓN TÍPICA [REF. 9]

5.4. SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN

El diseño no incluye una barrera de filtración, como un núcleo de baja permeabilidad, sino que se basa en una amplia playa (>400 m). Sin embargo, debido a la ubicación del entorno tropical de la instalación que recibe significativamente más lluvia en relación con la mayoría de las otras grandes presas de la línea central, es necesaria una barrera de filtración sobre la cara aguas arriba de la presa hasta que se establezca la amplia playa [Ref. 9].

Debido a lo anterior, se coloca un material de transición (saprolita) sobre la pendiente aguas arriba de la presa Norte, entre la cresta de la presa de arranque (El. 76 m) a la transición entre las subidas aguas abajo a la línea central [Ref. 9].

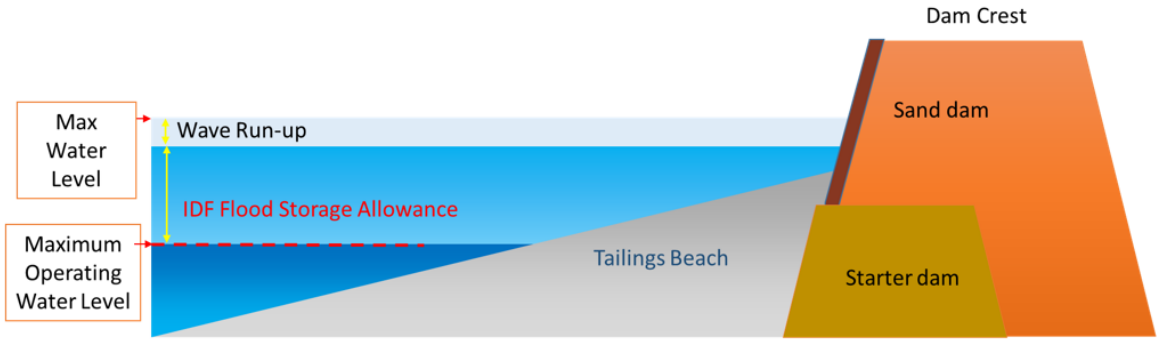

FIGURA 5-5: DETALLE DEL SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN PARA NORTH DAM [REF. 16]

Por otro lado, la Presa Este no cuenta con un sistema de protección contra la erosión, ya que naturalmente el estanque operativo está más cerca de la Presa Norte. Para que el estanque operacional no entre en contacto con la Presa Este, se incluyen consideraciones especiales en la deposición y operación, para mantener una playa de relaves lo suficientemente ancha como para acomodar la inundación de 24 horas sin exceder la elevación de la playa de relaves. Estas consideraciones se abordan en el capítulo 5.6.2

5.5. DESAGÜES SUBTERRÁNEOS.

El propósito de los desagües inferiores es mantener una superficie piezométrica baja dentro de la presa. Sobre las plataformas de roca de desecho, los desagües inferiores también funcionan como filtros de transición entre la arena de desagüe y la plataforma de roca de desecho.

No hay fuentes de préstamo naturales para los materiales de drenaje inferior granular denominados Zona 3 y Zona 9; donde la zona 3 es un material de filtro con D_{15} de 0.7 mm según lo recomendado por USACE (2004) [Ref. 17]. Además, para minimizar la segregación, el $_{D90}$ del material de filtro es inferior a 20 mm con referencia a un tamaño mínimo de $_{D10}$ inferior a 0,5 mm. La zona 9 es piedra transparente que se usó como capa de drenaje para la almohadilla de construcción de celdas de arena [Ref. 10].

Debido a la inexistencia de material de préstamo natural en la zona, FQML está produciendo los materiales triturando la roca de desecho NAG de los pozos. Por esta razón, los diseños de drenaje subterráneo se desarrollaron a través de un proceso iterativo para reducir el volumen de los materiales de la Zona 3 y la Zona 9 sin dejar de cumplir con los criterios de diseño.

El diseño considera tres tipos de drenaje que se describen Tabla 5-3 y se muestran en la Figura 5-6 y la Figura 5-7.

Tipo de drenaje	Diseño	Zona 9 (Piedra transparente) Espesor (m)	Zona 3 (Filtro) Espesor (m)
Drenaje primario	Encima de las plataformas de roca de desecho.	2	1
Drenaje de dedo	Drenajes estrechos (10 m a 20 m) para aumentar la capacidad de drenaje desde áreas aisladas hasta los drenajes primarios.	1	1-Arriba 0.5 – por debajo
Desagüe de manta	Presente sobre la mayor parte de la cimentación y transporta la filtración desde la colocación de arena hidráulica (subdesbordamiento) hasta un drenaje primario o de dedos.	-	1.5

TABLA 5-3: TIPOS DE DRENAJE INFERIOR [REF. 9]

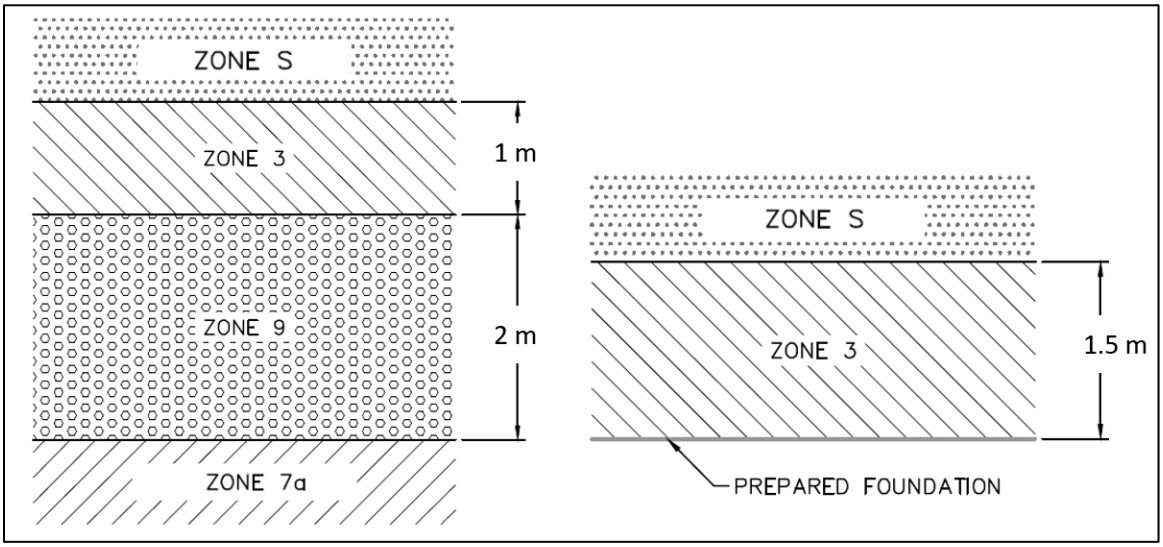

FIGURA 5-6: DETALLE TÍPICO DE DRENAJE PRIMARIO (IZQUIERDA) Y DRENAJE DE MANTA (DERECHA) [REF. 9]

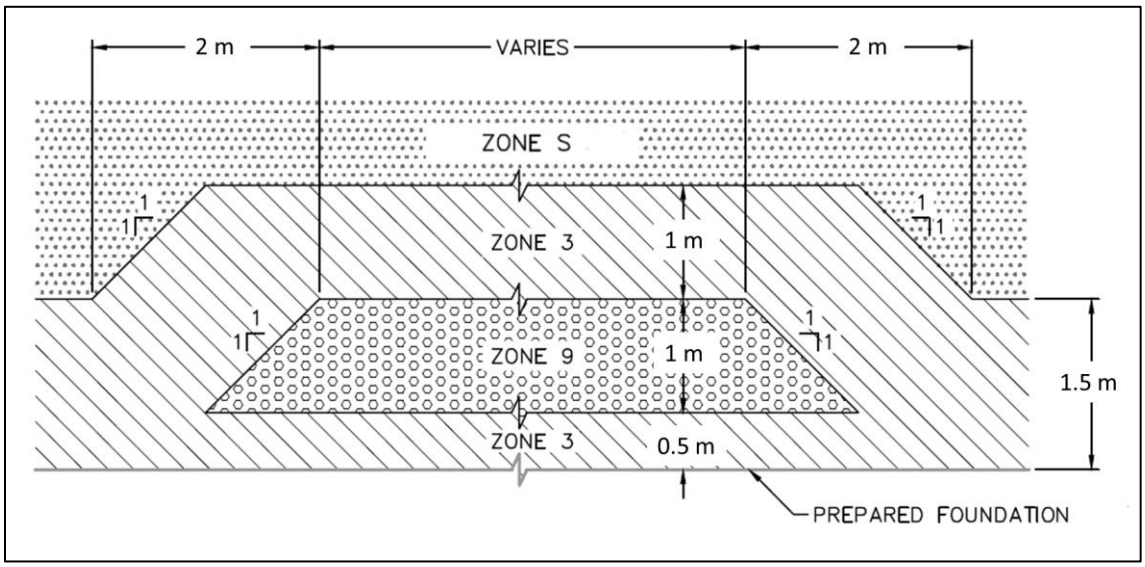

FIGURA 5-7: DETALLE TÍPICO DEL DRENAJE DE DEDOS [REF. 9]

La Figura 5-6 muestra la existencia de un material denominado Zona 7a, que corresponde a un material de relleno de roca fino que se usó en la parte inferior de la carcasa aguas abajo en la capa inferior del sistema de filtro, como una zona de transición entre la Zona 3 (filtro) y la Zona 7 (relleno de roca) [Ref. 10].

Además, en ambas figuras se aprecia un material denominado Zona S que corresponde a la arena de subdesbordamiento producida a partir de un proceso ciclónico de dos etapas de relaves más ásperos y su especificación indica que debe colocarse mecánicamente para evitar daños por erosión durante la colocación hidráulica superpuesta. [Ref. 9]

Los planos del sistema de drenaje obtenidos del proceso de iteración llevado a cabo por KCB para las Represas Norte y Este se muestran en Figura 5-8, Figura 5-9 y Figura 5-10.

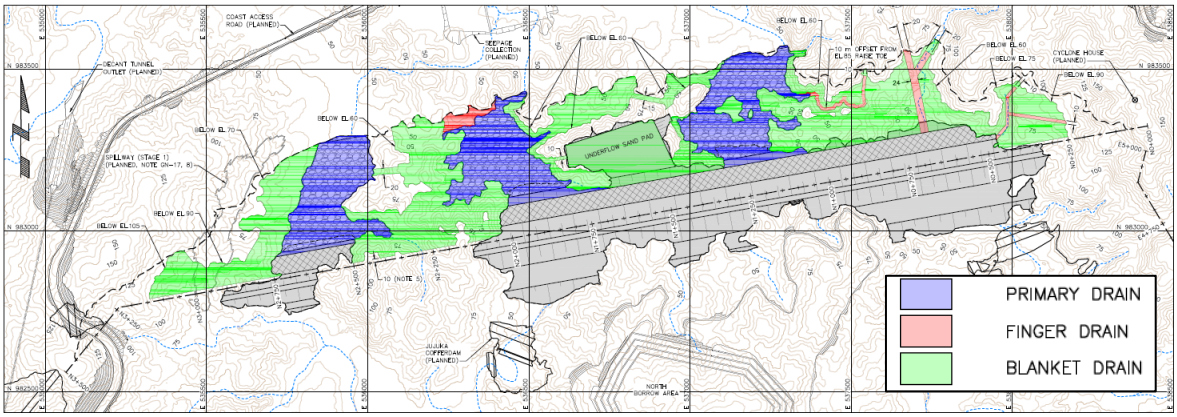

FIGURA 5-8: DISEÑO DEL SISTEMA DE DESAGÜE INFERIOR PARA LA PRESA NORTE

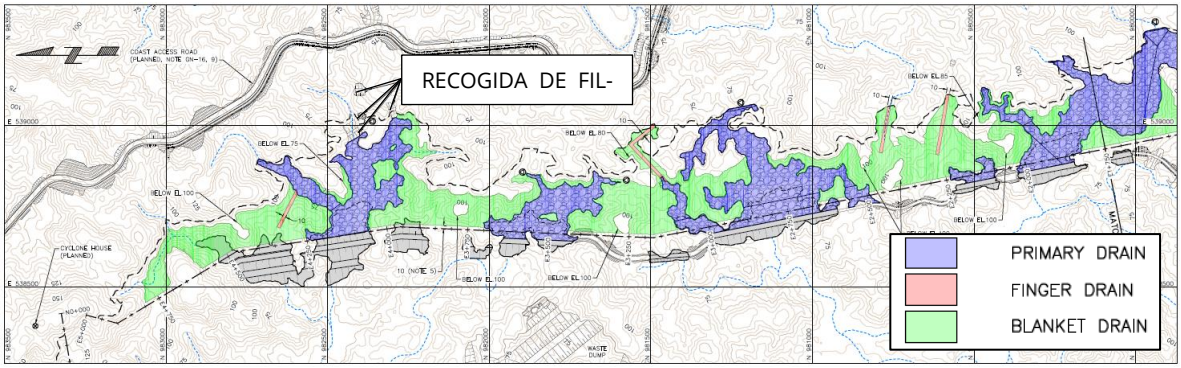

FIGURA 5-9: DISEÑO DEL SISTEMA DE DESAGÜE INFERIOR PARA LA PRESA ESTE

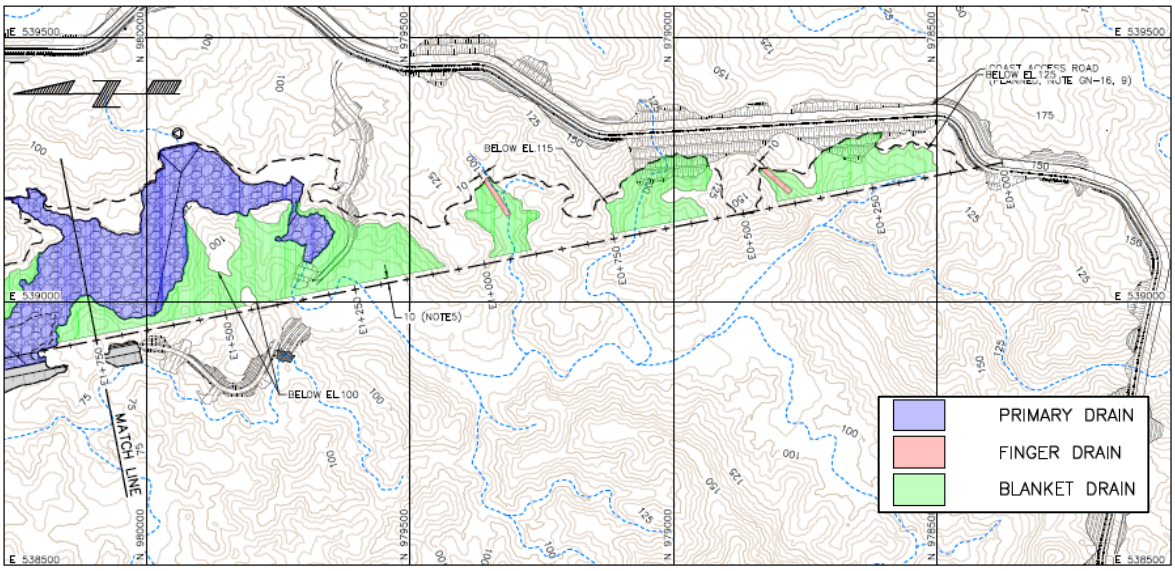

FIGURA 5-10: CONTINUACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE INFERIOR DE LA PRESA ESTE

5.6. GESTION DEL AGUA

FQML ha establecido una serie de estructuras de gestión del agua para recolectar y bombear el agua al embalse o para algún otro uso en el sitio. Algunos de los aspectos relevantes para el FMEA se mencionan a continuación en las siguientes secciones.

5.6.1. DISEÑO DE INUNDACIONES

Golder (2021) determinó el valor probable de precipitación máxima (PMP) utilizando el método estadístico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM); estimando un valor de 890 mm para un período de retorno de 24 horas y 1000 años.

El proceso completo y los detalles de la obtención y para otra duración de las tormentas se describen en el Informe del Golder de Actualización del Análisis de Precipitaciones [Ref. 12].

5.6.2. FRANCOBORDO

En 2015, KCB desarrolló una evaluación de rutas de inundación para los años 2 a 5, para estimar los niveles potenciales de inundación del estanque TMF y el tiempo de reducción para varios eventos del período de retorno suponiendo que la descarga es a través de la torre de decantación solo; es decir, ningún flujo de salida a través del vertedero, que encontró un riesgo de contacto entre el estanque y la arena de subdesbordamiento durante los primeros 4 años y la distancia vertical entre la elevación máxima de inundación durante el evento de diseño de flujo de entrada (IDF), inundación máxima probable (PMF), está más de 3 m por debajo de la cresta del dique para los casos evaluados [Ref. 9].

Después, en 2020, Golder desarrolló nuevos análisis a partir de los nuevos valores de PMP. Nuevamente, estos análisis suponen que la descarga es solo a través del túnel de la torre de decantación. El estudio muestra que, para la condición real, la elevación máxima del estanque para una duración de 24 horas PMP alcanzaría un nivel de 82.9 m.s.n.m. equivalente a un aumento máximo de la elevación del estanque de 2.8 m con respecto a la operación normal [Ref. 12].

Además, FQML considera que se puede generar una posible ola de 0.9 m debido a una tormenta de viento, lo que, sumado al riesgo de contacto entre el estanque y la arena de subdesbordamiento indicada por KCB, hace necesario el requisito de al menos 4 metros de protección hidráulica de la pendiente aguas arriba de la Presa Norte para asegurar la integridad del terraplén. Esta protección corresponde a la barrera de saprolita descrita en 5.4 [Ref. 16]

Como la presa Este no cuenta con un sistema de protección contra la erosión, es necesario mantener un mínimo de 400 m de ancho de playa para cumplir con el subsidio de almacenamiento por inundación (FSA). Este valor se redujo de 600 m a 400 m ya que, si es necesario mantener un ancho de playa de relaves de 600 m, la Presa Norte vería reducido su francobordo, por lo que 400 m es un valor considerado para ambas presas, en términos de compatibilidad entre la

protección de la presa Este con respecto al estanque, así como maximizar la asignación de almacenamiento por inundación (FSA).

5.6.3. SISTEMA DE TORRE DE DECANTACIÓN

Actualmente, el TMF incluye una torre de decantación y un túnel como la única medida de descarga del exceso de agua del estanque desde el TMF y debido a la gran captación y la alta precipitación, se espera una descarga continua [Ref. 9].

El agua del estanque fluirá sobre el amplio vertedero de la cresta de la torre de decantación y hacia abajo por gravedad. Luego se descarga al medio ambiente al oeste del TMF a través del túnel de decantación [Ref. 9]. La elevación del vertedero se puede elevar para gestionar el nivel del estanque [Ref. 9].

Los estudios realizados por Golder (2020) han determinado que el túnel de drenaje tiene una capacidad de evacuación de 70 m^3/s sin desarrollar presión [Ref. 13]. Esta capacidad, junto con el volumen disponible en el TSF asociado con el francobordo operativo de 4,0 m, es suficiente para manejar el IDF asociado con el PMP de 24 horas, para la Etapa 2.

5.6.4. GESTIÓN DE FILTRACIONES

Aguas abajo de la presa norte, el suelo ondulado natural generalmente se inclina lejos del terraplén. Las escorrentías y filtraciones serán recolectadas y desviadas a estanques de recolección de filtraciones. A la inversa, la topografía natural río abajo del terraplén del Este es irregular y generalmente se inclina hacia el terraplén. FQML establecerá una serie de estructuras de gestión del agua para recolectar y bombear el agua al embalse o para algún otro uso en el sitio [Ref. 9].

El punto de recogida de filtraciones se puede observar en la Figura 5-8 y la Figura 5-9.

6. METODOLOGÍA FMEA

6.1. MATRIZ DE PROBABILIDAD

Matemáticamente, la probabilidad de ocurrencia corresponde a la relación entre el número de veces que ocurre un evento para un experimento dado y el número de repeticiones totales.

La matriz de probabilidad es una herramienta que describe y califica la probabilidad de ocurrencia de un evento (por ejemplo, la falla principal de la presa causada por un terremoto). Por lo general, esta matriz se define por la evaluación interna de aceptabilidad de riesgos de la empresa minera.

Para este análisis, Nava propuso utilizar la matriz de probabilidad recomendada por Robertson [Ref. 8] para TSFS. Esta matriz fue aceptada por FQML para el análisis. Esta matriz de probabilidad se muestra en la Tabla 6-1

TABLA 6-1: MATRIZ DE PROBABILIDAD

	Tipos y descripciones de probabilidad
Valoración de probabilidad	Probabilidad de ocurrencia por consecuencias de seguridad (Robertson, 2003) (eventos/año)
No es probable (NL)	<0,01% de probabilidad de ocurrencia
Baja (L)	0,01 - 0,1% de probabilidad de ocurrencia
Moderada (M)	0.1 - 1 % de probabilidad de ocurrencia
Alta (A)	1 - 10% de probabilidad de ocurrencia
Esperado (E)	>10% de probabilidad de ocurrencia

6.2. MATRIZ DE CONSECUENCIAS

La matriz de consecuencias es una herramienta que clasifica la consecuencia de un evento en función de criterios y definiciones adoptados de acuerdo con los aspectos que el propietario de la mina considere de interés, o de acuerdo con la legislación local o los estándares globales. Ejemplos de estos aspectos son salud y seguridad, medio ambiente, reputación, entre otros. Por lo general, la consecuencia se define para diferentes niveles o calificaciones, cada uno de ellos asociado a una descripción.

Para este proyecto, la matriz de consecuencias Nava propuso utilizar la matriz del Estándar Global sobre Gestión de Relaves para la Industria Minera [Ref. 14], que considera la población potencial en riesgo, la pérdida potencial de vidas, el medio ambiente, la salud, los aspectos sociales y culturales, y la infraestructura y la economía.

La matriz de consecuencias de este proyecto se muestra en la Tabla 6-2.

TABLA 6-2: MATRIZ DE CONSECUENCIAS

	Tipos y descripciones de consecuencias				
Clasificación de consecuencias	Población potencial en riesgo	Pérdida potencial de vidas	Medio ambiente	Salud, Social y Cultural	Infraestructura y Economía
Baja	Ninguno	Ninguno esperado.	Pérdida o deterioro mínimo a corto plazo del hábitat o de especies raras y en peligro de extinción.	Efectos mínimos y perturbación de los negocios y los medios de subsistencia. Ningún efecto medible en la salud humana. No interrumpir el patrimonio, la recreación, la comunidad o los bienes culturales.	Pérdidas económicas bajas: el área contiene infraestructura o servicios limitados. <US$ 1M.
Considerable	1 – 10	Indeterminado	No hay pérdida o deterioro significativo del hábitat. Contaminación potencial del suministro de agua de ganado/fauna sin efectos en la salud. Agua de proceso baja toxicidad potencial. Los relaves no generan ácido potencialmente y tienen un bajo potencial de lixiviación neutra. Restauración posible dentro de 1 a 5 años	Interrupción significativa de negocios, servicios o dislocación social. Baja probabilidad de pérdida del patrimonio regional, recreación, comunidad o bienes culturales. Baja probabilidad de efectos sobre la salud.	Pérdidas de instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte utilizadas con poca frecuencia. <US$ 10M.
Alta	10 – 100	Posible 1 - 10	Pérdida o deterioro significativo del hábitat crítico o de especies raras y en peligro de extinción. Contaminación potencial del suministro de agua de ganado/fauna sin efectos en la salud. Procesar agua moderadamente tóxica. Bajo potencial de drenaje de rocas ácidas o efectos de lixiviación de metales de los relaves liberados. Área potencial de impacto 10 km^2 – 20 km^2. Restauración posible pero difícil y podría tomar > 5 años	500-1,000 personas afectadas por la interrupción de negocios, servicios o dislocación social. Interrupción del patrimonio regional, recreación, comunidad o bienes culturales. Potencial para efectos en la salud humana a corto plazo.	Altas pérdidas económicas que afectan la infraestructura, el transporte público y las instalaciones comerciales o el empleo. Reubicación/compensación moderada a las comunidades. <US$ 100M.

	Tipos y descripciones de consecuencias				
Clasificación de consecuencias	Población potencial en riesgo	Pérdida potencial de vidas	Medio ambiente	Salud, Social y Cultural	Infraestructura y Economía
Muy Alto	100-1000	Probable 10 - 100	Pérdida o deterioro importante del hábitat crítico o de especies raras y en peligro de extinción. Agua de proceso altamente tóxica. Alto potencial para el drenaje de rocas ácidas o los efectos de lixiviación de metales de los relaves liberados. Área potencial de impacto > 20 km^2. Restauración o compensación posible pero muy difícil y requiere mucho tiempo (5 años a 20 años).	1.000 personas afectadas por la interrupción de negocios, servicios o dislocación social durante más de un año. Pérdida significativa del patrimonio nacional, la comunidad o los bienes culturales. Potencial para efectos significativos a largo plazo en la salud humana.	Pérdidas económicas muy altas que afectan a infraestructuras o servicios importantes (por ejemplo, carreteras, instalaciones industriales, instalaciones de almacenamiento, para sustancias peligrosas) o empleo. Alta reubicación/compensación a las comunidades. < US$ 1B.
Extrema	> 1000	Muchos (>100)	Pérdida catastrófica de hábitat crítico o especies raras y en peligro de extinción. Agua de proceso altamente tóxica. Muy alto potencial para el drenaje de rocas ácidas o los efectos de lixiviación de metales de los relaves liberados. Área potencial de impacto > 20 km^2. Restauración o compensación en especie imposible o requiere mucho tiempo (> 20 años).	5.000 personas afectadas por la interrupción de negocios, servicios o dislocación social durante años. Patrimonio nacional significativo o instalaciones comunitarias o bienes culturales destruidos. Potencial de efectos graves y/o a largo plazo en la salud humana.	Pérdidas económicas extremas que afectan la infraestructura o los servicios críticos (por ejemplo, hospitales, grandes complejos industriales, grandes instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas) o el empleo. Reubicación/compensación muy alta a las comunidades y costos de reajuste social muy altos. >US$ 1B.

6.3. MATRIZ DE CLASIFICACIÓN DE RIESGO

La matriz de riesgo es una herramienta de doble entrada que trabaja en función de la probabilidad de ocurrencia de un evento y de la calificación de sus consecuencias. Con la probabilidad y la consecuencia, se determina un nivel de riesgo que varía de bajo a extremo.

Al igual que en las matrices de probabilidad y consecuencia, la definición de cada nivel de riesgo responde a las necesidades o intereses del propietario de la mina. Es común observar que cada empresa tiene sus propias definiciones y establecimientos de niveles de riesgo.

Por lo general, la matriz de clasificación termina siendo una matriz diagonal donde el nivel de riesgo aumenta con la probabilidad y/o consecuencia del evento. Para este proyecto, Nava propuso una matriz de riesgos basada en su experiencia en el desarrollo de FMEA para diferentes minas. FQML ha estado de acuerdo con la matriz propuesta.

La matriz de clasificación de riesgo se muestra en la Tabla 6-3. La clasificación de riesgo se presenta como Baja (L), Moderada (M), Alta (H) y Extrema (E) junto con un código de colores. El verde, amarillo, naranja y rojo representan el mayor riesgo. Estos niveles de riesgo también pueden estar asociados a los niveles de atención para cada riesgo. El riesgo bajo (L) se asocia con una atención pasiva, el riesgo moderado (M) requiere un monitoreo diligente, el riesgo alto (H) requiere una gestión activa y el riesgo extremo (E) requiere una acción inmediata.

TABLA 6-3: MATRIZ DE CALIFICACIÓN DE RIESGO

Valoración de probabilidad	Baja	Considerable	Alta	Muy Alto	Extrema
No es probable (NL)	L	L	L	M	M
Baja (L)	L	L	M	M	H
Moderado	M	M	H	H	E
Alta (A)	M	H	H	E	E
Esperado (E)	H	H	E	E	E

6.4. IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO

Nava identificó los modos de falla para el TSF antes del Taller de FMEA con el propósito de tener esta información esencial disponible. Sin embargo, antes del taller de FMEA, los modos de falla y sus desencadenantes se enviaron al personal a cargo de las operaciones del TSF para su revisión y validación para verificar que no se omitieron los modos de falla.

Los modos de fallo típicos para las TSF se explicaron en detalle en la sección 4.2. Todos esos modos de falla se consideraron en el análisis definiendo diferentes desencadenantes que pueden conducir a su ocurrencia. Para este TSF, los problemas del sistema de drenaje y la licuefacción (presa y suelo de cimentación) se han incluido como modos de falla. Por lo general, estos se consideran desencadenantes de otros modos de fallas, como la inestabilidad global. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas de este TSF, estos se evaluaron por separado con el propósito de darles más importancia y atención.

En la Tabla 6-4, se muestra un ejemplo del modo de falla sísmica para la Presa Norte. Esta tabla es un extracto de la hoja de cálculo utilizada para el FMEA y se puede encontrar completa en el Apéndice I.

TABLA 6-4: EJEMPLO DE UN MODO DE FALLO Y SUS CONTROLES

Event ID	Dam Identifier	Dam	Risk Description	Consequence	Trigger ID#	Trigger/ Threat/ Cause	Is Failure Mode Possible for Trigger	Current Design Controls	Confidence in Design Controls	Current Operational Controls	Confidence in Operational Controls
ND-2	ND	North Dam	Overtopping (water + tailings) - Sunny Day	Discharge downstream of the TSF dam	2	**Overtopping - Massive Settlement by Earthquake**: A large seismic event cause a settlement of the dam's body and/or the foundation soil, greater than the freeboard, leading to overtoping and potential loss of tailings	Yes	- Sensitivity Analysis was made for 10 m over the drain seepage and the results are acceptable of deformation with no risk of tailings loss (0.5 m freeboard lost) - Saprolite characterization was made using triaxial result (soil foundation). - Seismic deformation analysis shows that the settlement in soil foundation is acceptable.	High	- Permanent QA/QC for dam construction - Deformations as built analyses update (yearly) - Instrumentation monitoring (accelerograph), maintenance and additional Instrumentation plans	High

En esta hoja de cálculo, las columnas están asociadas a lo siguiente:

- ID de evento: Código de identificación para el modo de fallo.
- Identificador de presa: Código para identificar la presa.
- Dam: Nombre de la presa donde se produce el modo de falla.
- Descripción del riesgo: Breve descripción del modo de falla.
- Consecuencia: La consecuencia de cada modo de fallo se identifica e indica en esta columna.
- ID de desencadenante: Como se mencionó anteriormente, un modo de falla puede ser desencadenado por diferentes causas. Esta columna es un número correlativo de los diferentes desencadenantes para un modo de fallo particular.
- Desencadenante/Amenaza/Causa: Descripción del evento que conduce a la ocurrencia del modo de falla.
- ¿Es posible el modo de falla?: Esta columna tiene el propósito de indicar si el evento analizado se considera posible o no. En el caso de que el evento no se considere posible, este evento no se analiza, pero se registra.
- Controles de diseño actuales: Controles considerados en el diseño para evitar o disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento analizado.
- Confianza en los controles de diseño: Indica si los controles de diseño son adecuados para disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento analizado. Se consideran tres niveles: alto, medio y bajo.
- Controles operacionales actuales: Controles operacionales para evitar o disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento analizado.
- Confianza en los controles operacionales: En cuanto a los controles de diseño, indica si los controles operacionales son adecuados para disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento analizado. Se consideran tres niveles: alto, medio y bajo.

Tabla 6-5 muestra el número de modos de falla y los eventos totales identificados para cada presa.

TABLA 6-5: NÚMERO DE MODOS DE FALLA Y EVENTOS IDENTIFICADOS PARA CADA PRESA

Represa	Número de modos de falla crítica	Número de eventos
Presa norte	16	35
East Dam	16	35

6.5. TALLER FMEA

Con los modos de falla, desencadenantes, diseño y controles operativos validados por FQML, se realizó un taller en línea de FMEA en dos sesiones en diciembre de 2021. En este taller participaron personal de las operaciones del TMF y Nava. En este taller, se discutieron y acordaron las probabilidades y consecuencias para todos los eventos entre los participantes que obtuvieron la matriz de riesgos para el TMF.

Tabla 6-6muestra a los participantes del taller de FMEA.

TABLA 6-6: PARTICIPANTES DEL TALLER FMEA

Asistentes a FQML	Nava Asistentes
Margarita Mier (MMi)	Emilio López (EL)
Nicholas Mather (NM)	Manuel Cortés (MC)
Miguel Marinas (MMa)	

7. RESULTADOS DE FMEA

Los resultados del FMEA son 2 matrices, una matriz considerando los controles operativos y de diseño y la otra considerando solo los controles de diseño. Los resultados se muestran en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2.

TABLA 7-1: MATRIZ DE RIESGOS SOLO CON CONTROLES DE DISEÑO

All - Risk With Preventative Design Controls But No Preventative Operational Controls					
Likelihood Rating	**Low**	**Significant**	**High**	**Very High**	**Extreme**
Not likely (NL)			ND-5 ND-7 ND-10 ND-14	ND-15 ED-5 ED-7 ED-11 ED-14 ED-15	
Low (L)			ND-2 ND-3 ND-6 ND-9 ND-11 ND-12 ND-13 GF-1	ED-2 ED-3 ED-6 ED-9 ED-12 ED-13	
Moderate (M)			ND-4 ND-8	ND-1 ED-1 ED-4 ED-8 ED-10	
High (H)				ND-16 ED-16	
Expected (E)					

TABLA 7-2: MATRIZ DE RIESGOS CON DISEÑO Y CONTROLES OPERATIVOS

All - Risk With Preventative Design and Operational					
Likelihood Rating	**Low**	**Significant**	**High**	**Very High**	**Extreme**
Not likely (NL)			ND-2 ND-3 ND-4 ND-5 ND-6 ND-7 ND-9 ND-10 ND-11 ND-12 ND-13 ND-14 GF-1	ND-15 ED-2 ED-3 ED-4 ED-5 ED-6 ED-7 ED-9 ED-10 ED-11 ED-12 ED-13 ED-14 ED-15	
Low (L)			ND-8	ND-1 ED-1 ED-8	
Moderate (M)				ND-16 ED-16	
High (H)					
Expected (E)					

Los resultados muestran una reducción significativa de los riesgos cuando se consideran los controles operativos. Esto demuestra la importancia de la operación para mantener los riesgos controlados.

Los resultados muestran riesgos que varían de bajos a altos. Los mayores riesgos con los controles de diseño y operativos establecidos son los mismos para ambas presas, estos modos de falla están asociados con la contaminación de las aguas subterráneas de la cuenca del TMF que se ha evaluado con un alto riesgo. El resto de los modos de falla se han evaluado como riesgos medios o bajos.

Vale la pena señalar que los riesgos asociados a los modos de falla que consideran una falla catastrófica de la presa y la liberación de agua y relaves, son generalmente más altos para East Dam. Esto se debe principalmente a una clasificación de mayor consecuencia debido a la cercanía de la Ciudad Nueva Sinaí ubicada aguas abajo de la Presa Este.

8. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un FMEA para el TSF utilizando una matriz de probabilidad con 5 niveles basada en la propuesta por Robertson[Ref. 8]. La matriz de consecuencias se creó en base a la matriz de clasificación de consecuencias presentada por el Estándar Global de la Industria sobre Gestión de Relaves[Ref. 14]. La matriz de riesgo se crea combinando la calificación de la matriz de

probabilidad y la clasificación de la matriz de consecuencias. Todas estas matrices fueron proporcionadas por Nava y aceptadas por FQML para el análisis.

En este FMEA se identificaron y evaluaron 32 modos de falla. Los resultados indican que considerando que no hay controles operativos preventivos, 4 eventos son de bajo riesgo, 19 son de riesgo medio, 7 son de alto riesgo y 2 son de riesgo extremo. Teniendo en cuenta los controles operativos actualmente vigentes, como el monitoreo del TSF y la instrumentación de la presa, entre otros, estos números cambian significativamente teniendo 12 eventos como de bajo riesgo, 18 de riesgo medio y 2 de alto riesgo sin tener ningún riesgo extremo. Esto muestra que el riesgo del TMF está actualmente muy influenciado por el rendimiento de la operación para controlar el riesgo.

Vale la pena señalar que los riesgos asociados a los modos de falla que consideran una falla catastrófica de la presa y la liberación de agua y relaves, son generalmente más altos para East Dam. Esto se debe principalmente a una clasificación de mayor consecuencia debido a la cercanía de la Ciudad Nueva Sinaí ubicada aguas abajo de la Presa Este.

9. REFERENCIAS

[Ref. 1] Ayyub, B.M. (2014) Análisis de Riesgos en Ingeniería y Economía, 2ª ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA,; ISBN 978-1-4665-1826-1.

[Ref. 2] Robertson, A.; Shaw, S. (2006) Cierre de Mina; Info Mine E-Book: Vancouver, BC, Canadá.

[Ref. 3] Valis, D.; Koucky, M. (2009) Visión general seleccionada de las técnicas de evaluación de riesgos. PROBL. Eksploat. 4, 19–32.

[Ref. 4] Hartford, D.N.D.; Baecher, G.B. (2004) Riesgo e Incertidumbre en la Seguridad de una Presa; Thomas Telford Publishing: London, UK,; ISBN 9780727740397.

[Ref. 5] Kupper, A.G.; Hurndall, B.; Morgenstern, N.; Sobkowicz, J.; Abeda, W.; Baldwin, G.; Cameron, R.; Eenkooren, N.; Grapel, C.; Martens, S.; et ál. Presas de relaves de deslizamiento de arenas petrolíferas: ¿cuándo una presa ya no es una presa? En Actas de la 17ª Conferencia Internacional sobre Relaves y Residuos de Minas, Banff, AB, Canadá, 3–6 de noviembre de 2013

[Ref. 6] Dos Santos, R.N.C.; Caldeira, L.M.M.S.; Serra, J.P.B.; Dos Santos, R.C. FMEA de una presa de relaves. Georisk: Evaluar. Manag. Ing. Riesgo 1866. Geohazards 2012, 6, 89–104

[Ref. 7] Davies, M., Martin, T. y Lighthall, P. (2000). Presas de relaves de minas: cuando las cosas van mal. *Presas de relaves*, 261-273.

[Ref. 8] Robertson, A.; Shaw, S. (2009) Gestión de Riesgo para Estructuras Geotécnicas mayores en Minas.

[Ref. 9] KCB (2015) Terraplén de Relaves Diseño de la elevación de la arena de desagüe. 1824-363-M02-RPT-00002-R0.

[Ref. 10]JVP (2013). "Instalación de Gestión de Relaves. Reporte de Status de Diseño" Revisión PB. Documento N ° 504832-2310-4GER-0001-Rev.PB.

[Ref. 11]Davies, M., Martin, T. y Lighthall, P. (2000). Presas de relaves de minas: cuando las cosas van mal. *Presas de relaves*, 261-273.

[Ref. 12]Golder (2021). Actualización del análisis de precipitación. 199-215-3476-TR001_Rev.0.

[Ref. 13] Golder (2020) Análisis hidráulico del sistema de descarga pasiva TMF. 1992153476-MT007_Rev.0.

[Ref. 14]ICMM, ONU, PRI. (2020) 'Global Industry Standard on Tailings Management', (https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard-ontailings-management.pdf).

[Ref. 15]KCB (2014) Proyecto Mina de Cobre Panamá: Estudio de compensación – Diseño de terraplenes de relaves. Documento N ° 1824-363-C02-LTR-00003-R2.

[Ref. 16]Presentación: FQML (2021). Elevación 2 TMF – Riesgos vinculados a la gestión de estanques, operaciones de TMF

[Ref. 17]MAGFOR. 2002. Manual del Ingeniero 1110-2-2300, Diseño General y Consideraciones de Construcción para Presas de relleno de Roca y Tierra. Departamento del Ejército, Cuerpo de Ingenieros

[Ref. 18]Operaciones de TMF (2021). Revisión mínima de la longitud de la playa de relaves. MPSA-TMF-TQ-036.

[Ref. 19]Operaciones de TMF (2021). Inundación de diseño de flujo de entrada en la presa de arena Elevación 2 (IDF). MPSA-TMF-TQ-049.

APÉNDICE A

Hoja de cálculo de probabilidad

APÉNDICE B

Hoja de cálculo de consecuencias

HANDLING YOUR FOOTPRINT

NAVA CONSULTING

www.navaconsulting.cl
info@nava.cl

Matilde Salamanca 76, piso 6
Providencia, Santiago, Chile